

Gátak méretezése módosított RMR tényező figyelembe véve

Laufer Imre

BME Építőmérnöki Kar, bincy@freemail.hu

Vásárhelyi Balázs

BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tsz. & Bohn Kft., vasarhelyib@freemail.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: A cikk célja, hogy bemutassa a tagolt kőzetkörnyezetben épülő gáttestek állékonyságának kiszámításának lehetőségét. A cikk Romana ilyen irányú kutatásait foglalja össze, aki a mérnökgeológiában általánosan használt RMR-módszert fejlesztette tovább (Romana, 2003a; 2003b; 2004). A számításoknál fontos szerepe van a kőzettest alakváltozási modulusának értékének is, melyet ezen tényező ismeretében lehet megbecsülni — ennek meghatározási módját külön is bemutatjuk.

Kulcsszavak: RMR érték, kőzettest osztályozás, völgyzáró gátak

1 BEVEZETÉS

Egy nagy gát majdnem mindig egy egyedi mű, aminek tervezését a környezet morfológiájával, az alapkőzet teherbírásával és a folyó vízjárásával hangolnak össze. A gát és a tározott víztömeg a felszín nagy területeivel kerül kölcsönhatásba, gyakran a gáttól messze lévőekkel is. Egy gát tervezése és építése összetett és sok esetleges tényezőt tartalmazó tevékenység, amit nehéz szabványosítani. Ennek ellenére a gátakat lehetséges és szokás is rendszerezni. Egy gát tervezésénél általános a hasonló terepen, hasonló módon épült gátakra, mint elődökre hivatkozni. A kőzetkörnyezet szilárdsági és alakváltozási tulajdonságai a különböző típusú gátaknál igen eltérő. Irányelvként elmondható, hogy a betongátakat (és a CFRD beton homlokfelületét) sziklára, a töltés típusú gátakat talajra is lehet alapozni.

Bevett gyakorlat, hogy a környezet gátalapozásra való alkalmasságát bizonyos tulajdonságok és az ezekhez tartozó minőségi index (pl. földrengések P-hullámainak sebessége, mállottság foka) vizsgálata alapján mérlegelik. Ezek a tulajdonságok főképp az áteresztőképesség (gyakran Lugeon egységben kifejezve), a nyírószilárdság (beleértve a kohéziót és a súrlódási szöveget), és a felszín alakváltozási tulajdonsága. A gát képes kell legyen felduzzasztani a folyót, elegendő biztonsággal kell rendelkezzen elcsúszás, illetve kibillenés ellen, valamint a felszín alakváltozásaihoz túlzott repedésképződés nélkül kell alkalmazkodnia.

Ezek miatt célszerű, ha a mérnökgeológiai-geotechnikai feltárás során kapott kvantitatív adatokat egy olyan rendszer szerint értékeljük, ami a gát tervezésének, építésének és üzemeltetésének szempontjait veszi figyelembe. Ez az a koncepció, ahol belép a kőzettest geomechnikai osztályozása. Egy érdekes példája ennek az Itaipú-gátnál használt úgynevezett „Engevix előosztályozás”, amivel a főgáthoz csatlakozó hosszú szárnytöltések alapozásához készített feltárások során szerzett rendkívüli adatmennyiséget tette kezelhetővé. Ez a rendszer alapvetően egy osztályozó rendszer, ami a kőzettest tulajdonságait az alapján súlyozza, hogy mekkora a befolyásuk az alapozás biztonságára.

Az RMR-t, mint geomechnikai mérőszámot alagutakhoz, sziklarézsűkhöz és kőzettesten történő alapozásokhoz eredetileg Bieniawski (1973) vezette be, majd folyamatosan módosította

azt. Az RMR használata valóban sokrétű: rendkívül gyakran használatos a földalatti munkáknál, ritkán sziklarézsűknél, de alapozásoknál szinte alig. Nagyon kevés az alkalmazásról szóló cikk, egy fontos témát kivéve: a kőzettest alakváltozási modulusának E_m becslése. Számos szerző utalt az RMR-re, mint hasznos eszközre a sziklában történő alapozások leírásában. (Az RMR módszer leírását magyarul lásd: Vásárhelyi, 2004; Gálos és Vásárhelyi, 2006).

2 NEHÉZSÉGEK AZ RMR GÁTAKNÁL TÖRTÉNŐ HASZNÁLATÁBAN

Az RMR gátaknál történő alkalmazását több ok nehezíti. A víznyomás figyelembe vétele bizonytalan (a víznyomás értéke a gátalapozás mentén változik, a gátak változó vízszintekkel működnek). Nincsenek jó szabályok, hogy a tagoltság irányának módosító hatását számszerűsítsük (ami ideális esetben jellemzi a biztonságot elcsúszás, helyi tönkremenetel és vízszivárgás ellen). A kőzet és a kőzettest és a tagoltság tulajdonságai is változnak a víz hatására (telítődés, kiszáradás, áramlás a tagoltság mentén).

Az elcsúszás elleni ellenállás ritkán okoz problémát, de akadtak ilyen tönkremenetek is, mint pl. Malpasset-ben. A lehetséges helyszínek összehasonlításakor a gáttervező mérnököknek gyorsan fel kell becsülni több szempontot: a helyszín általános megfelelősége az egyes gáttípusokhoz, a mállott sziklarétegek szükséges eltávolítási mélysége (ha szükséges), a talaj- vagy kőzetjavítás (injektálás) szükséges mértékét. Ezért nem lehet egyetlen irányelvvel és mérőszámmal leírni az alkalmasságot, ráadásul a követelmények minden gáttípusnál különbözőek.

A gát feszültségeinek, nyúlásainak és alakváltozásainak számításához szükség van a kőzettest deformációs tulajdonságainak megbecslésére. Pontosan emiatt a geomechanikai osztályozás és a kőzettest rugalmassági modulusa (E_m) közötti empirikus kapcsolatok mindig nagyon népszerűek voltak. Az első ilyen összefüggést Bieniawski javasolta (1978), majd számos szerző javasolt módosításokat a pontosítására. Ezen összefüggések két dolgot nem vesznek figyelembe: a kőzettest anizotrópiáját és a víz hatásait.

3 A VÍZ HATÁSA AZ ALAP RMR-RE

Az RMR tényező két részből áll: az ún. RMR_B -ből („alap” RMR), és a tagoltságok ismeretében történő módosító tényezőből. Az „alap” RMR_B az építmény jellegétől független tényező, 5 RMR tényező összege a tagoltsági irány tag nélkül. Az ötödik paraméter, WR, a víznyomást veszi figyelembe, az RMR_B -n belül max. 15 pontos súllyal (a lehetséges maximum 15 %-ként). A legjobb módszer a víz hatását erre a jellemzőre a víznyomás-arány felhasználása:

$$r_u = u/\sigma_v,$$

ahol u a víznyomás, σ_v pedig a teljes függőleges feszültség. A WR-t a következő képlet alapján becsülhetjük:

$$WR = 10 \log (1/r_u) - 1.5 \text{ (érvényességi tartomány } 0.02 < r_u < 0.7 \text{)}$$

WR	15	10	7	4	0
$r_u(1)$	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5
$r_u(2)$	0-0,2	0,07	0,14	0,28	0,7

1. Táblázat - WR és r_u kapcsolata (1) Bieniawski szerint, (2) képlet alapján

A gát körül az r_u értéke pontról pontra változik a völgy geometriájának, a vízszintnek és adott esetben a vízzáró függöny hatékonyságától függően. Emiatt az r_u értékének pontos számításához a gát és a környezetének 3D-s áramlási modelljére lenne szükség. Mivel a felvízi pontok nagy részére igaz, hogy $r_u > 0,4$, ezért a WR értékei 2,5-nél kisebbek lesznek ezeken a helyeken. A szikla egyirányú nyomószilárdsága a vízzel való telítéssel gyorsan csökken és az RMR-en belüli értéke a felére is visszaeshet. Így a víz hatását a szilárdságra durva közelítéssel úgy vehetjük figyelembe, hogy levonunk 20 pontot az RMR „száraz” értékéből.

Ha elfogadjuk a Serafim-Pereira-képletet az E_m becslésére az RMR -ből ($E_m = 10^{(RMR-10)/40}$, lásd később), a $10 < RMR < 70$ tartományban az E_m (légszáraz) értéke az E_m (telített)-nek körülbelül a háromszorosa. Az eredményt azonban nem támasztják alá a publikált adatok, amelyek

alapján telített állapotban az E_m 40 %-os csökkentése tűnik helyesnek. Emiatt közelítésként az E_m (telített)-et a „légszáraz” RMR 10 pontos csökkenésével kaphatjuk a Serafim-Pereira-képlet alapján.

Általánosságban elmondható, hogy a víz hatásainak figyelembe vétele nem csak az E_m -nek az RMR-ből történő becslésénél okoz komoly problémát, hanem általában az RMR gátaknál történő használatánál.

Hoek, a Hoek-Brown törési határfeltételből kiindulva azt javasolta, hogy a számításokban használjanak „száraz” RMR-értéket, amit a WR legnagyobb értékével számíthatunk, a valós pórusvíznyomás egyidejű bevezetésével (Hoek et al, 2002.). Nem kétséges, hogy ez egy pontos megoldás gépi számításnál, amit ki lehetne terjeszteni a felvízi rész geomechanikai osztályozására, ahol magas a víznyomás értéke.

A száraz RMR_B tényezőt az első négy paraméter összegéből, 15 pont hozzáadásával kapjuk:

1. paraméter: Nyomószilárdság valós körülmények között;
2. paraméter: RQD;
3. paraméter: a mértékadó tagoltság megnyílása;
4. paraméter: a mértékadó tagoltság állapota;
5. paraméter: WR, ebben az esetben mindig 15.

4 GÁTAK ELLENÁLLÁSA ELCSÚSZÁS ELLEN

Bieniawski és Orr (1976) a következő módosító tényezőket javasolta a tagoltság irányának figyelembe vételére a vízszintes irányú stabilitásánál (2. táblázat), „az alapozási sziklatömeg feszültségeloszlására vonatkozó tapasztalatok és megfontolások alapján, valamint azzal a feltételezéssel, hogy egy gátszerkezetben mind a gravitációs, mind az ívhatás fellép”.

Súlygát	nagyon kedvező	kedvező	megfelelő	kedvezőtlen	igen kedvezőtlen
Dőlés (°)	0-10	30-60	10-30 a.f.	10-30 f.f.	60-90
Értékelés	0	-2	-7	-15	-25

2. Táblázat: A tagoltság dőlésének befolyása a gát stabilitására - módosító tényezők (Bieniawski & Orr, 1976) a.f: alvíz felé f.f: felvíz felé

Snell és Knight (1991) a problémát szisztematikusan közelítették meg, figyelembe véve az összes erőt és feszültséget, amelyek a gátakra hatnak. Az ő tanulmányuk és másokéi alapján is úgy tűnik, hogy más módosító tényezőket kell használnunk. A 3. táblázatban találhatóak az új, kísérleti módosító tényezők a fő diszkontinuitások (tagoltsági) irányának megfelelően. A Bieniawski által javasolt értékeket megtartották.

Gát típusa	Nagyon kedvező	kedvező	megfelelő	kedvezőtlen	Igen kedvezőtlen
Töltés	más	10-30 a.f.	0-10 b.	-	-
Súlygát	10-60 a.f.	30-60 f.f. 60-90 b.	10-30 f.f.	0-10 b.	-
Ívgát	30-60 a.f.	10-30 a.f.	30-60 a.f. 60-90 b.	10-30 f.f.	10-30 b.
R _{STA}	0	-2	-7	-15	-25

3. Táblázat: A tagoltság dőlésének befolyása a gát stabilitására – R_{STA} tényezők (Romana, 2003) a.f: alvíz felé f.f: felvíz felé b: bármely irányba

Ha a fő tagoltsági rendszer dőlésiránya nem közelíti meg a gát alvíz-felvíz-tengelyét, az elcsúszás veszélye a geometriai nehézség miatt gyorsan csökken. Ezt a hatást figyelembe vehetjük, ha a gát stabilitási tényezőjét (R_{STA}) megszorozzuk egy geometriai korrekciós tényezővel:

$$CF = (1 - \sin(\alpha_d - \alpha_j))^2 \quad \text{ha} \quad \alpha_d > \alpha_j \text{ és}$$

$$CF = (1 - \sin(\alpha_j - \alpha_d))^2 \quad \text{ha} \quad \alpha_j > \alpha_d,$$

ahol α_d a gáttengely iránya és α_j a fő tagoltsági rendszer dőlésiránya.

$$DMR_{STA} = RMR_{BD} + CF \times R_{STA}$$

ahol RMR_{BD} (száraz RMR_B) az első öt RMR-paraméter összege és R_{STA} az elcsúszás elleni stabilitási tényező 3. táblázatból.

Még nem létezik tényleges adat a DMR_{STA} és az elcsúszás elleni biztonság közötti kapcsolat felállítására, de hozzávetőlegesen a következő mondható el:

$60 < DMR_{STA}$	nem mértékadó probléma
$30 < DMR_{STA} < 60$	problémát jelent
$DMR_{STA} < 30$	komoly probléma

Ezek az értékek azonban nem kezelhetők szigorú határértékeként, hanem inkább irányértékként, figyelmeztető jelként kell kezelje őket a tervező. A gát stabilitását minden egyes esetben ellenőrizni kell a tervezőnek, figyelembe véve a gátalapozás mentén a víznyomás eloszlását és a fő tagoltság nyírószilárdságát. Erről a kérdésről Nagy Gátak Spanyol Nemzeti Bizottsága a következőt nyilatkozta. „A gátak elcsúszás elleni biztonságának vizsgálatához szükség van a közettest szilárdságának ismeretére. A geomechanikai osztályozás és a közettest szilárdsága közötti egyszerű összefüggések nem elég megalapozottak gátak esetében.” (SCOLD 1999)

5 IRÁNYELVEK A GÁTALAPOK KIEMELÉSÉHEZ ÉS SZILÁRDÍTÓ INJEKTÁLÁSÁHOZ

A betongátak sziklaalapozására vonatkozó legáltalánosabb követelmény az, hogy „jó minőségű, ép szikla, üde, nem mállott”. Sharma (1998) konkrétan fogalmazza meg a követelményt, hogy „a teljes (alapozási) felületet le kell csupaszítani a szilárd szikláig, ami képes viselni a terheket. Minden gyenge vagy puha réteget el kell távolítani, és betonnal kell helyettesíteni.” Előírja az összes kitöltetlen vagy puha anyaggal kitöltött tagoltság betonnal történő kitöltését, az USBR szabályozásnak megfelelően.

Legtöbb esetben az alapozáshoz addig mélyítik le a gödröt, amíg legalább II-es osztályú sziklához érnek a völgy középső részein (ahol a gát magasabb), és II-III-as osztályú szikláig a terelő falaknál. Az árvízvédelmi túlfolyókat lehetőség szerint I-es osztályú sziklára alapozzák. A leggyakrabban alkalmazott kőzetosztályozási paraméter a P-hullámok sebessége volt, amit geofizikai mérések alapján határoztak meg. Manapság a közettesteket leggyakrabban az ISRM által javasolt módszerrel vizsgálják és írják le, ami gyors osztályozást tesz lehetővé.

Célszerű a gátalapozások RMR-értékeiről adatokat gyűjteni. Átmenetileg javasolható néhány egyszerű irányelv a kitermelésre és a néhány méter mélységig végzett szilárdító injektálásra, amelyeket a 4. táblázat foglalja össze.

Gát típusa	Kiemelés RMR_{BD} -ig ⁺	szilárdító injektálás szükségessége az RMR_{BD} alapján		
		szisztematikus	helyenként	nem szükséges
Töltés	-	-	-	-
Kőrakat	>20 (>30)	20-30	30-50	>50
Súlygát	>40 (>60)	40-50	50-60	>60
Ívgát	>50 (>70)	50-60	60-70	>70

4. Táblázat: Javasolt irányelvek gátalap kiemeléshez és szilárdító injektáláshoz

(Romana, 2003) ⁺: minimum - (elvárt) értékek

A kőrakatnál megadott értékek a süllyedésérzékeny, beton- illetve aszfaltborítású gátakra vonatkoznak.

6 AZ RMR ÉS EM KÖZÖTTI ÖSSZEFÜGGÉS

6.1 Általános bevezetés

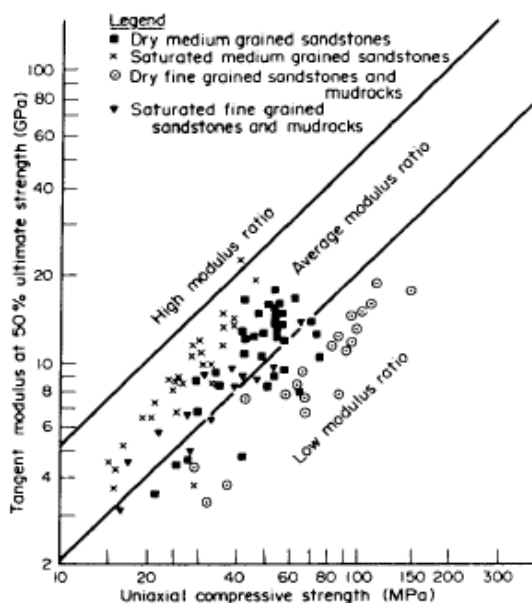
A kőzettest alakváltozási modulusának (E_m) az értéke erősen változó lehet a főfeszültség irányától függően. Rétegzett, vagy uralkodó tagoltsági iránnyal rendelkező kőzetben az ekvivalens alakváltozási modulus értékét a következő módon számolhatjuk: ha a feszültség párhuzamos a tagoltság irányával, akkor a mérési eredmények súlyozott számtani közepeként, ha merőleges a feszültség, akkor súlyozott harmonikus középként. Emiatt a merőleges rugalmassági modulus a legkisebb és a párhuzamos a legnagyobb. A kettő közötti különbség az anizotrópia erősödésével együtt nő. Barton (1983) a következő képleteket javasolta:

$$\begin{aligned} E_{\min} &= 0,4 E_{\text{átl}}, \\ E_{\max} &= 1,6 E_{\text{átl}}, \text{ és ez alapján} \\ (E_{\max} - E_{\min}) / E_{\text{átl}} &= 1,2. \end{aligned}$$

A fentiek az alakváltozási modulus minimális és maximális értékei között négyszeres arányt tételeznek fel. Ez az összefüggés helyes lehet erősen anizotrop vagy rétegzett kőzetekre. Homogén kőzettestekben a rugalmassági modulusok közötti arány kisebb. Számos szerző közölt helyszíni vizsgálatokból szerzett adatokat (5. táblázat). Mindegyik esetben a számított RMR érték az alapérték kell legyen, azaz a Bieniawski által alapokhoz javasolt, tagoltság irányát figyelembe vevő tag nélkül. Emellett az alakváltozási modulusnak a legnagyobb főfeszültség irányától való függése azt sugallja, hogy erre egy módosító tényezőt vezessünk be.

helyszín	kőzettest	E_{\max}/E_{\min}	szerző
Colbun erőmű	andezit	1,4	Van Sint (1993)
Ridracoli gát	márga	1,3	Oberti et al (1986)
	homokkő	1,4	
Tamzaourt gát	homokkő	1,3	Jaoui et al (1982)
	aleurolit	1,9	

5. Táblázat: Néhány helyszíni mérésen alapuló adat az E_{\max}/E_{\min} értékre (Romana, 2004 alapján)



Telített állapotban a víz a kőzet szilárdságát és az alakváltozási modulusát is csökkenti, ami a gátépítésben egy fontos hatás. A GSI bevezetésével lehetőség nyílt a víz hatásának egyszerű kezelésére: az RMR-t a teljesen száraz kőzettestre számítjuk és a víznyomást a gépi számítással kezeljük (Bieniawski 2000-ben). Ez a módszer viszont nem törődik a szilárdság és rugalmassági modulus csökkenésével telített állapotban. Az 1. ábrán (Pells, 1993) a száraz és telített Hawkesbury-homokkővek Deere-Miller-diagrammja látható (szilárdság, és rugalmassági modulus a törőfeszültség 50 %-ánál). A telítődés mindkét tényező egymással arányos csökkenését vonja magával, de a hányadosuk nagyjából állandó marad.

1. ábra: Hawkesbury homokkő szilárdsági és rugalmassági értékei (Pells, 1993)

6.2 Az RMR és E_m közötti javasolt összefüggések

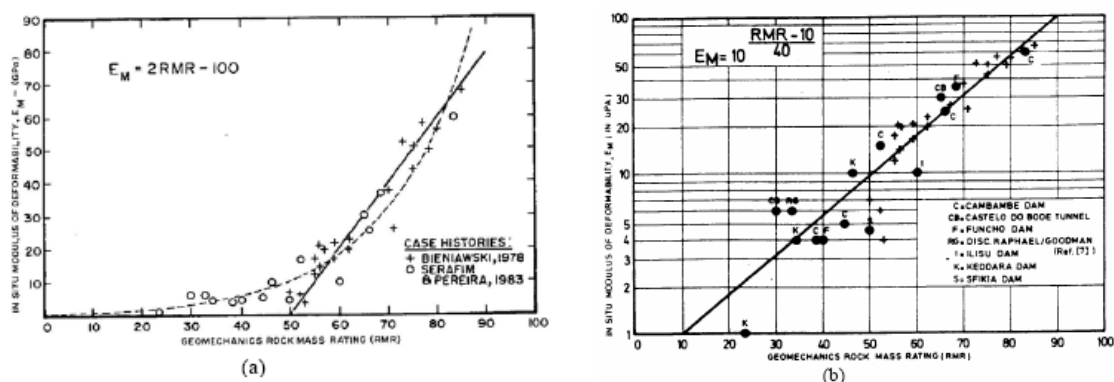
Bieniawski (1978) a következő összefüggést javasolta:

$$E_m \text{ (GPa)} = 2 \text{ RMR} - 100,$$

és a 2. ábrán látható, hogy a képlet megfelelő lehet az $\text{RMR} > 65$ tartományban, viszont nagy szórást mutat az $55 < \text{RMR} < 65$ tartományban (a gyakorlatban ez igen gyakori tartomány), és nem használható a $\text{RMR} < 55$ -re. Bieniawski a képlet használatához „jó mérnöki érzéket” ajánl. Bieniawski képletét Serafim és Pereira (1983) módosította:

$$E_m \text{ (GPa)} = 10^{(\text{RMR}-10)/40} \quad (2a, 2b \text{ ábrák})$$

és ez a formula terjedt el a mérnöki gyakorlatban. Ez a képlet $\text{RMR} > 34$ -re működik megfelelően. Az adatsorukban csak 3 alacsonyabb RMR-rel rendelkező eset szerepelt (22, 30, 33), és a korreláció mindhárom esetben rossz volt. A 2-es ábrán mind a Bieniawski-, mind a Serafim-Pereira-összefüggés látható. A gyakorlatban a legtöbb mérnök az USA Federal Energy Regulatory Commission (1999) előírásaihoz hasonlóan jár el: „ $\text{RMR} > 58$ esetben a Bieniawski-képlet használandó, $\text{RMR} < 58$ értékekre a Serafim-Pereira-összefüggés”. Úgy tűnik, az $\text{RMR} = 58$ értéket azért választották határnak, mert itt metszik egymást a görbék.



2.ábra: Helyszíni (in situ) alakváltozási modulus és RMR között
a) Bieniawski (1978) és b) Serafim és Pereira (1983) szerint

Hoek és Brown (1997) a Serafim-Pereira-összefüggés módosítását javasolták annak érdekében, hogy figyelembe vegyék a kőzet nyomószilárdságát σ_c (MPa):

$$E_m \text{ (GPa)} = (\sigma_c/100)^{1/2} \times 10^{(\text{RMR}-10)/40}.$$

Ezt az összefüggést az RMR minden értékére ajánlják. A Serafim-Pereira-összefüggés értékei a 100 MPa nyomószilárdságú kőzetekre vonatkoznak, ami nem jellemző az általuk vizsgált $\text{RMR} < 50$ tartományba eső kőzetekre. A Hoek & Brown által javasolt módosítás a nagy RMR-tartományban, valamint a víz próbatestekre gyakorolt hatásának figyelembe vételekor (légszáraz, telített állapot) lehet hasznos. Hoek megjegyzi, hogy „Az összefüggés elég jól működött azokban az esetekben, amikor alkalmazták. Viszont a mérési eredmények mennyiségének növekedésére szükséges lehet az összefüggés módosítása”. Valójában nincsenek olyan adatok, amelyek ennek a módosításnak az alkalmazását támasztanák alá kis és közepes keménységű kőzetek esetében.

A 2002-es cikkükben Hoek, és társai bevezettek egy további, ún. D „zavartsági tényezőt”:

$$E_m \text{ (GPa)} = (1-D/2) \times (\sigma_c/100)^{1/2} \times 10^{(\text{GSI}-10)/40}$$

Az új D tényező „lehetőséget ad a robbantási károsodás és a relaxáció hatásainak figyelembe vételére”, az értékét alagutak, rézsűk és kőfejtések esetében adott irányelvek alapján lehet becsülni, de gátak esetében nem. Mivel a gátak alapozásánál a kőkitermelést a szabályok szerint nagyon gondosan végzik, D értéke alacsony lesz, de nem lehet 0 a dekompresszió miatt. D értéke Romana (2003) szerint közelítőleg:

- Jó állapotú sziklában, normál robbantásnál $D = 0,4$
- Bármilyen sziklában irányított robbantásnál $D = 0,2$
- Laza közetben, mechanikus kitermelésnél $D = 0,2$

6.3 Ajánlott képletek

A publikált adatok a következő ajánlásokat támasztják alá:

- $RMR_{BD} > 60$ Bieniawski-képlet
- $60 > RMR_{BD} > 35$ Serafim-Pereira-képlet
- $35 > RMR_{BD}$ egyik képlet sem ad jó közelítést, tájékozásképpen a Serafim-Pereira-képlet használható

Az adatok nem támasztják alá a Serafim-Pereira-képlet Hoek által javasolt módosítását. A jó-közepes minőségű (pl. RMR II-III. osztály) és közepes szilárdságú (pl. $\sigma_c = 50$ MPa) kőzetekre kapott eredmények nem konzisztensek a publikált E_m -értékekkel.

6.4 Az anizotrópia hatása E_m -re

E_m a kőzet anizotrópiájától és a legnagyobb feszültségirányától függ. Ezeket a következő ökölszabállyal lehet figyelembe venni.

- Nagyon anizotróp kőzetekben:
 $E_{max}/E_{min} = 4$.
 E_{max} -ot $RMR_B + 8$ -ből számíthatjuk, míg E_{min} -t $RMR_B - 16$ -ből.
- Kissé anizotróp kőzetben:
 $E_{max}/E_{min} = 1,4$ érték körül alakul.
 E_{max} -ot $RMR_B + 2$ -ből számíthatjuk, és E_{min} -t $RMR_B - 1,4$ -ből.

Ezek csak közelítő értékek, de hasznosak lehetnek, ha a gátalapozás alatti feszültségmező érzékenységet vizsgáljuk. A legjobb megoldás egy korrekciós tényező bevezetése lenne, ami a talagsági felületek irányultságától függene.

6.5 A víz hatása az E_m -re

A víz alakváltozási modulusra (E_m -re) gyakorolt hatása már tárgyalásra került. Nincs publikált irodalom erre vonatkozólag, és a legtöbb mérnök ugyanazt az E_m -et alkalmazza a gát elárasztás előtti és utáni állapotára. A leggyakrabban használt WR-érték 7 és/vagy 10, ami a száraz ($WR=15$, $r_u=0$) és a telített ($WR=0$, $r_u>0.5$) közötti kompromisszumnak tekinthető. A fent említett ökölszabály (E_m -et az RMR_B-10 -ből számítjuk a Serafim-Pereira-képlettel) csak egy ötlet.

7 AZ ALAPOZÁS DEFORMÁLHATÓSÁGÁNAK HATÁSA A GÁT VISELKEDÉSÉRE

7.1 Általános bevezetés

A gátmérnökök között általános egyetértés van abban, hogy két eset veszélyes a betongátak normális működése szempontjából: ha az alapozás mentén E_m értéke erősen változik, vagy ha az E_c/E_m arány eléri egy bizonyos értéket (E_c a beton rugalmassági modulusa). Rocha (1964) egy cikkében kidolgozta az azóta a legtöbb gátmérnök által „klasszikusnak” tekintett és követett szabályát íves gátak esetére (6. táblázat).

Az $E_c/E_m < 4$ esetben a viselkedés egyszerű, az alapfeltárási költségeket jelentősen lehet csökkenteni Oliveira (1990) szerint. A legkisebb biztonságos (de már problémákat okozó) E_m ívgá-

tak esetében $E_m = 5$ GPa körül van. Az $E_m < 5$ GPa sziklára alapozott gátak komoly problémákat mutatnak (beleértve a repedezést is) az E_m alacsony értéke miatt.

E_c/E_m	Gát viselkedésére való hatás	Fellépő problémák
< 1	elhanyagolható	semmi
1-4	kis jelentőségű	semmi
4-8	fontos	néhány
8-16	nagyon fontos	komoly
> 16	beavatkozás szükséges	nagyon veszélyes

6. táblázat: az E_c/E_m -arány hatása az ívgátak viselkedésére (Rocha, 1964)

Rocha egy későbbi cikkében (1976) kiterjesztette a munkáját súlytámfalként működő gátakra. Ez alapján $E_c/E_m < 8$ biztonságos és $E_c/E_m > 16$ esetben mérsékelt – nagy problémák keletkeznek. A betongátakban elhelyezett dilatációs egységek segítenek áthidalni a relatív deformálhatóság problémáját. Ez állhat az RCC-gátakra¹ vonatkozó tervezési előírások változásának a hátterében, az első RCC-gátaktól indulva (majdnem dilatációs egységek nélkül épültek), egészen a mai előírásokig. Mindezek mellett az RCC-ből épült gátak kevésbé érzékenyek a hagyományos, vibrált betonból készült gátakhoz képest az E_c alacsonyabb értéke miatt.

7.2 E_c értéke hagyományos vibrált és RCC-betonban

Andriolo (1995) cikkében részletesen összehasonlítja a hagyományos vibrált (CVC), és az RCC-beton tulajdonságait. A 3. ábra 5 hagyományos betonból és 13 RCC-ből épült gát E_c -értékeit mutatja.

Az átlagértékekből az alábbi kapcsolat olvasható le:

- $E_{RCC} = 0.40 E_{CVC}$ 7-28 napos korban
- $E_{RCC} = 0.55 E_{CVC}$ 90 napos korban

90 napos korban az E_{CVC} 28 és 51 GPa között változik, 39 GPa átlagértékkel, ugyanitt az E_{RCC} 11 és 32 GPa között változik, 22 GPa-s átlaggal. A nagy variáció a cementtartalom eltéréseinek tudható be, de hagyományos betonokra feltehetjük, hogy $E_{CVC} = 30/36$ GPa, és RCC-nek $E_{RCC} = 20$ GPa (gyakran ennél is alacsonyabb)

7.3 Irányelvek a DMR_{DEF} -hez

Zeballos és Soriano (1993) publikálták egy szerteágazó és intenzív tanulmányt az E_c/E_m arány hatásáról ívgátak és súlygátak esetében. A 7. táblázat (az eredményeik alapján) az egyes RMR_{DEF} -tartományokhoz kapcsolja a lehetséges, a gát és az alapozás közötti merevségkülönbség miatti problémákat.

Gát E_c (GPa)	Gát magassága (m)	Normális	Problémák	Súlyos problémák
Ív, 36 GPa	< 100	> 50	40-50	< 40
	100-150	> 65	50-65	< 50
	150-200	> 75	60-75	< 60
Súlygát, CVC 30 GPa	< 50	> 40	25-40	< 25
	50-100	> 50	40-50	< 40
	100-150	> 60	50-60	< 50
Súlygát, RCC 20 GPa	< 50	> 35	20-35	< 20
	50-100	> 45	35-45	< 35
	100<	> 55	45-55	< 45

7. táblázat: betongátak alakváltozási problémái a DMR_{DEF} függvényében (Romana, 2003)

¹ RCC: Roller Compacted Concrete, alacsony péptartalmú beton, ami teherautóval szállítható, a terítését dózerrel és a tömörítését vibrohengerrel végzik.

DMR_{DEF} (a Serafim-Pereira-képlet szerint az RMR-ből meghatározott alakváltozási modulus) függ az E_m -től (ha a kőzet telített), és $WR = 5$ -tel becsülhetjük. (a névleges átlagértékhez, $r_u = 0,25$ -höz tartozó érték).

8 GÁTTESTEK NUMERIKUS MODELLEZÉSE

A víz és a telítődés hatását a gátalapokra végeselemes modell segítségével vizsgáltuk. A számítások során 3 súlygátat, és gátanként 4 különböző DMR_{DEF} -értékű és merevségű kőzetet hasonlítottunk össze. A súlygátak geometriáit megépült gátak alapján vettük fel, mindegyik gát a 7. táblázat súlygátakra vonatkozó részének egy-egy kategóriáját képviseli. A kombinációk a következő táblázatban láthatók:

gát / DMR_{DEF}	DMR_{DEF} 20	DMR_{DEF} 30	DMR_{DEF} 40	DMR_{DEF} 50	DMR_{DEF} 60	DMR_{DEF} 70
Les Clées (32m)						
Robiei (68m)						
Albigna (115m)						

A végeselemes modellt a Plaxis 8-as programmal végeztük, síkbeli alakváltozási állapotot feltételezve. A gát modellje a völgy mélyvonalán vett metszet, mint tárcsa.

A modellben a gát betonját és az alapkőzetet is lineárisan rugalmas – tökéletesen képlékeny anyagként modelleztük, Mohr-Coulomb törési feltétellel. A C10/12-es szilárdsági osztályú betont a szilárdsági jellemzők várható értékével jellemeztük (Eurocode szerinti anyagjellemzők), a húzószilárdságát is figyelembe véve. A kőzetestre nem engedtünk meg húzófeszültségeket (tension cut-off).

A gát viselkedését, a feszültségek és alakváltozások alakulását a különböző állapotokat figyelembe véve vizsgáltuk: gátalap kiemelése, gát megépítése, tározó feltöltése, feduzzasztása.



Les Cles gát
(épült: 1955)

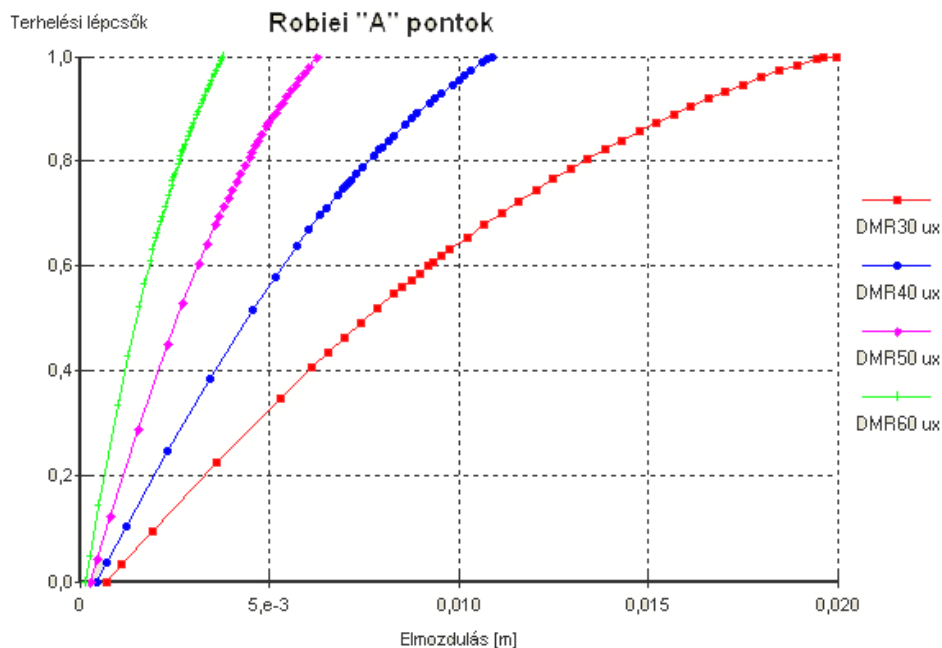
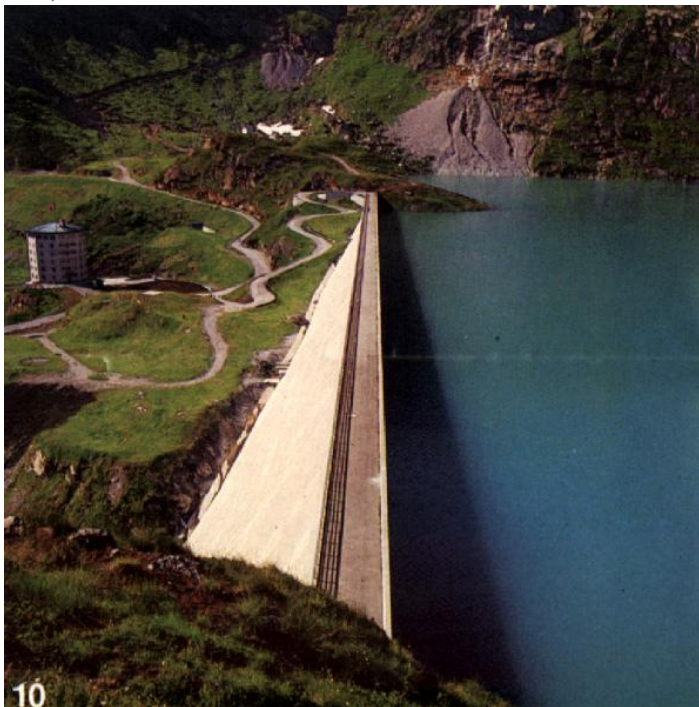
8.1 Számítási eredmények értékelése

A számítások eredményeként kapott elmozdulásokból számítottuk a gát elfordulását. Ehhez a felvízi homlokfal legalsó (A) és legfelső (C) pontjainak az elmozdulásából számítottuk a homlokfal elfordulását (kis elmozdulások elve alapján), mivel ez jellemzi a legjobban a rugalmas alap miatti billenést. A két pont erő-elmozdulás-görbéjére jellemző a nem-linearitás (8. és 9. ábrák). Ez annak az eredménye, hogy a terhelés növekedésével az alvízi talppont környezetében „koncentrálódnak” a normálfeszültségek.

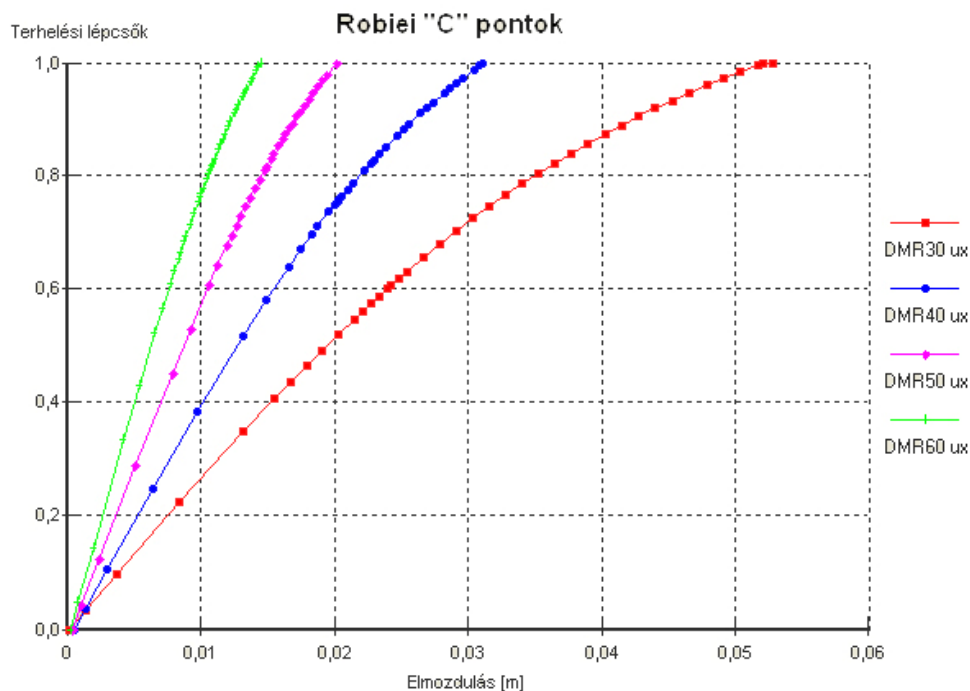
Az elfordulások és az alap DMR_{DEF} -értéke (és ezen keresztül az alakváltozási modulusa) közötti kapcsolatot vizsgálva a következő állapítható meg:

- A DMR_{DEF} -érték növekedésével a gát elfordulása exponenciálisan csökken. Ez az $RMR-E_m$ -kapcsolat ($RMR < 58$ esetében) exponenciális voltából várható viselkedés.
- Adott DMR_{DEF} -érték mellett az elfordulás jó közelítéssel négyzetesen változik, a víznyomás magassággal négyzetesen arányos növekedését követve (a $\delta = c \cdot H^2$ összefüggésben a c nem teljesen azonos mindhárom esetre, ez a beton rugalmas összenyomódásának tudható be.)

Robiei gát
(épült: 1967)



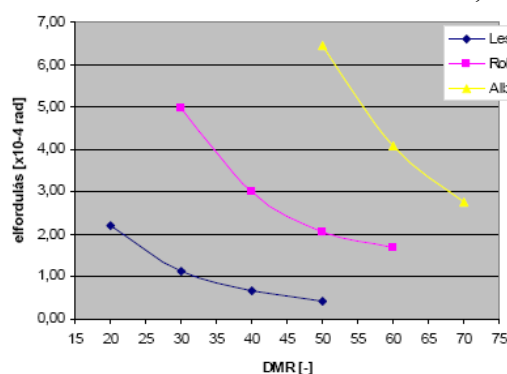
8. ábra „A” pontok vízszintes elmozdulása a Robiei-gátnál



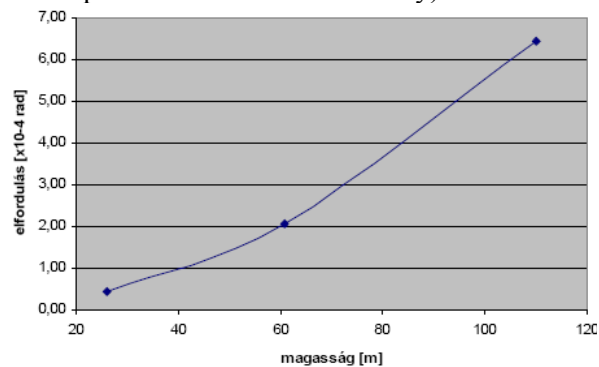
9. ábra: „C” pontok vízszintes elmozdulása a Robiei gátnál

gát / DMR _{DEF}	magasság	DMR _{DEF} 20	DMR _{DEF} 30	DMR _{DEF} 40	DMR _{DEF} 50	DMR _{DEF} 60	DMR _{DEF} 70
Les Clées	26,2 m	2,21	1,14	0,66	0,44		
Robiei	60,8 m		4,96	3,01	2,06	1,70	
Albigna	110 m			*	6,43	4,09	2,77

8. táblázat: felvízi homlokfal elfordulása, $\bullet 10^{-4}$ rad (* adott paraméterekkel nem állékony)



10. ábra: Elbillenés DMR_{DEF} függvényében



11. ábra: Elbillenés DMR_{DEF}=50-nél a magasság függvényében

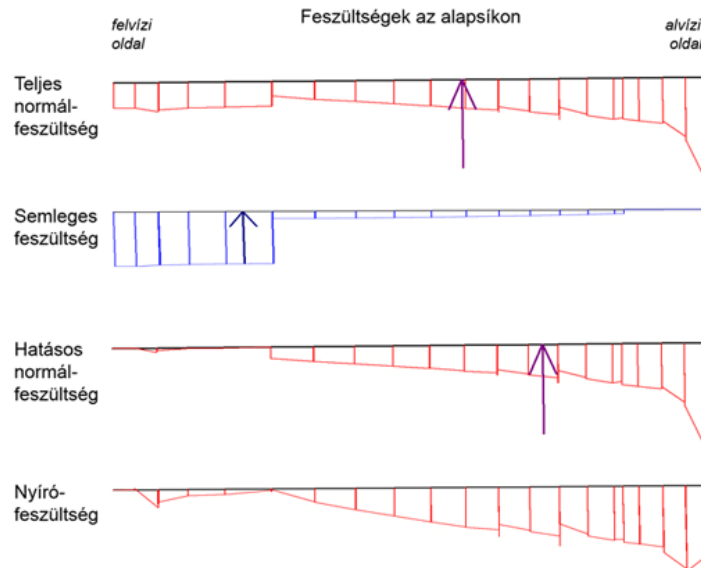
A feszültségi ábrát és a törési határállapotban levő pontok elhelyezkedését vizsgálva a következő következtetések vonható le.

- **Üres tározó:** Tele tározónál a helyes geometriai arányokkal rendelkező súlygát merivest-szerű elbillenése nem okoz problémát, viszont üres állapotban, gyenge közetnél előfordulhat az alap alatt nyírási törés, és ezzel együtt a felborulás. A vizsgált esetek mindegyikében több-kevesebb pont elérte a nyírási teherbírás határát.

Míg az alacsonyabb DMR_{DEF}-értékkel rendelkező esetekben a törés hossza elég nagyra adódott, és egy csúszólap kialakulását jelezte, addig a magasabb DMR_{DEF}-értéknél a törés csak a sa-

rokpont körüli feszültségkoncentráció miatt következett be, és mérete is csekély maradt. Az üres tározó esetére tehát megalapozottak a 2. táblázatban megadott DMR_{DEF} -intervallumok.

• **Tele tározó:** Tele állapotban inkább az elcsúszás jelent problémát. Ilyenkor az alapsíkon az alvízi talppont felé koncentrálnak a nyomófeszültségek, és a felvízi talppont környékén húzófeszültségek is felléphetnek. Ha ezen a szakaszon húzási törés lép fel, akkor a nyomófeszültségek még inkább az alvízi talppont felé „tolódnak”, erősítve az elbillenést. A felvízi talppont körüli repedésben kialakuló víznyomás további billentő erőt fejt ki a gátra. Az elcsúszás akkor lép fel, ha az alapsík nyomott zónája annyira lecsökken, hogy nem bírja felvenni a csúsztatóerőt. Azaz ha a gátalap mentén a húzásra kiesett szakasz és a Mohr-Coulomb-állapotban levő szakasz összeér, bekövetkezik az elcsúszás.



12. ábra: feszültségek az alapsíkon (Albiga, $DMR_{DEF}=60$)

Albiga gát
(épült: 1959)



Ez az eset bekövetkezett az Albigna gátnál (115m magasság), $DMR_{DEF}=40$ értéknél. Ezt a jelenséget törésmechanikai modellezéssel is sikerült előállítani (Chandra, 2005).

A Les Clées gátnál (32m magasság), $DMR_{DEF}=20$ értéknél a gát „orra” körül képlékeny zóna alakult ki. $DMR_{DEF}=30$ -nál már csak a felszín néhány pontja került képlékeny állapotba, ennél magasabb DMR_{DEF} -értéknél meg a képlékenyedés elhanyagolható területet érintett.

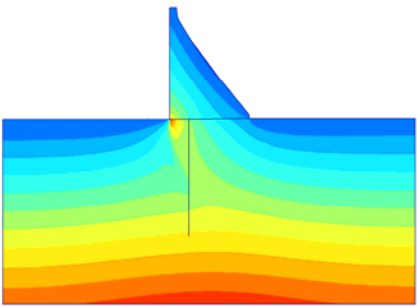
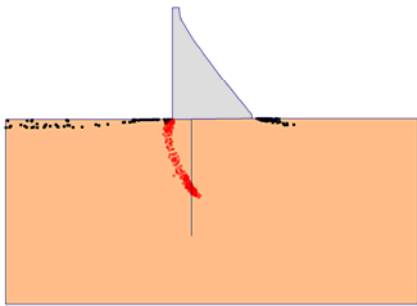
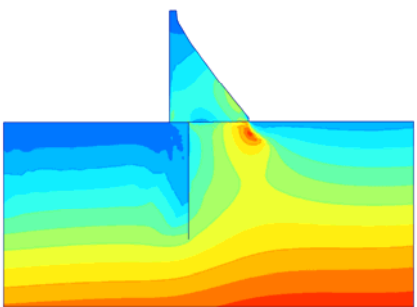
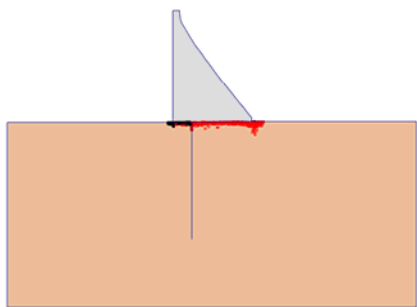
A Robiei gát (68m magasság) számításainak eredményeiből kitűnik, hogy $DMR_{DEF} = 30$ esetében is kiterjedt törési zóna alakult ki az alapsík mentén, de a csúszólap nem ér fel a felszínig. A gát a stabilitását nem veszítette el, de az üzem során jelentős problémák lépnének fel, pl. erős szivárgás az alapsík mentén. Magasabb DMR_{DEF} -értékeknél az alapsíknak csak kis szakasza nyíródott el.

Az Albigna gátnál (115m magasság) $DMR_{DEF} = 40$ -nél az alapsík hasonlóan elnyíródott, mint a Robiei gátnál $DMR_{DEF}=30$ esetében, viszont itt a talppontot nem „támasztotta meg szemből” közet, mint a másik esetben, és elcsúszás következett be. $DMR_{DEF} = 50$ és $DMR_{DEF} = 60$ esetekben az alapsík mentén kevesebb pont került nyírási törés állapotába, és $DMR_{DEF} = 70$ -nél nagyon kevés.

A gátak felvízi oldalán szinte mindegyik esetben megfigyelhető egy húzási törésvonal is. A Les Clées gátnál nem éles, és hamar elkanyarodik a gát talppontjától, de a másik két gátnál jól követi a vízzáró függőny vonalát. A törés kialakulásának az egyik oka, hogy a víznyomás és a gát önsúlyának az eredője az alvíz felé „nyomja le” a gátat, ami húzóást okoz a felvízi oldal közzetében. Másrészt a vízzáró függőny két oldalán a körüláramlás miatt erősen eltérnek a határoss feszültségek, és ez is segíti a törés kialakulását.

A 7. táblázatban megadott DMR_{DEF} -határok tehát ebben az esetben is jól alkalmazhatónak bizonyultak.

Példaként: Albigna gát (115m), $DMR_{DEF} = 40$ néhány eredménye:

	
<p>13. ábra: Főfeszültségek eloszlása üres tározónál</p>	<p>14. ábra: Törési állapotban levő pontok üres tározónál (piros: nyírás, fekete: húzás)</p>
	
<p>15. ábra: Főfeszültségek eloszlása tele tározónál</p>	<p>16. ábra: Törési állapotban levő pontok tele tározónál (piros: nyírás, fekete: húzás)</p>

Megjegyzés: a számítás során nem sikerült elérni a teljes terhelést, mivel a gát elcsúszott. Az ábrán jól megfigyelhető, hogy a felvízi sarokponntól kiinduló húzási repedés és a nyírásra tönkement zóna összeér. Magasabb DMR-értéknél a két zóna nem éri el egymást, és nem veszti el a szerkezet az állékonyságát.

FELHASZNÁLT IRODALOM:

- Andriolo F.R. 1995. *RCC properties*. Proc. Int. Symp. on Roller Compacted Concrete Dams. Santander Ed. IECA-CNEGP. pp 3-26.
- Barton N. 1983. *Application of Q-System and index test to estimate shear strength and deformability of rock masses*. Int. Symp Engng. Geol. & Underground Const. Lisbon. II. 51-70.
- Bieniawski Z.T. 1978. Determining rock mass deformability. Experience from case histories". *Int. J. Rock Mech and Min. Sci.* **15**: 237-242.
- Bieniawski Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley. New York, p. 252.
- Bieniawski Z.T. & Orr C.M. 1976. *Rapid site appraisal for dam foundation by geomechanics classification*. 12. ICOLD. México. Q46. R32.
- Chandra Kishen: *Recent developments in safety assessment of concrete gravity dams* Current Science, Vol. 89, 2005.
- Gálos M.; Vásárhelyi B. 2006. *Közzettestek osztályozása az építőmérnöki gyarkorlatban*. Műegyetemi K., p. 144
- Hoek E. & Brown E.T. 1997. Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.* **34**: 1165-1186.
- Hoek E., Carranza-Torres E & Corkum B. 2002. *Hoek-Brown failure criterium-2002 edition*. NARMS. Toronto.
- ICOLD 2000. *State-of-the-art of RCC dams*. Publication 75. Paris
- Oliveira R. 1990. *Probabilistic approach to the assessment of foundation properties*. Proc. Int. Workshop on arch dams. Coimbra (1987). Ed. Balkema 314-319.
- Pells P.J. 1993. *Uniaxial strength testing*. "Comprehensive rock engineering". Ed. J. Hudson. Ed. PERGAMON. Vol. 3, p. 75.
- Rocha M. 1964. *Statement of the physical problem of the arch dam..* Symp. On Theory of arch dams. Southampton.
- Romana, M. 2003a: *DMR (Dam Mass Rating). An adaptation of RMR geomechanics classification for use in dams foundations*. Proc. 10. ISRM, Durban.
- Romana, M. 2003b: *DMR, a new geomechanics classification for use in dams foundations, adapted from RMR*, Proc. 4. Int. Symp. on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams Madrid.
- Romana, M. 2004: *DMR (an adaptation of RMR), a new geomechanics classification for use in dams foundations*. Proc. 9. Cong. Luso de Geotecnia. Aveiro
- SCOLD 1999. *Guía técnica de seguridad de presas. 3. Estudios geológico-geotécnicos y prospección de materiales*. Ed. CNEGP (SCOLD) p. 287.
- Serafim J.L. & Pereira J.P. 1983. *Considerations on the Geomechanical Classification of Bieniawski*. Int. Symp. Engng. Geol. and Underground Const. Lisbon. 1: II.33 – II.42.
- Snell & Knigh 1991. *Susceptibility of dams to failure by sliding on sub-foundation strata that dip upstream*. 17. ICOLD Vienna, Q66 R88.
- Vásárhelyi B. 2004. Közzettest-osztályozási módszerek összefoglalása *Földtani Közlöny* **134**: 109-129.